



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Off nl gungsschrift  
10 DE 41 08 944 A 1

51 Int. Cl.<sup>5</sup>:  
G 01 B 9/02  
G 01 B 11/30  
B 23 Q 17/20  
G 01 N 21/45

21 Aktenzeichen: P 41 08 944.8  
22 Anmeldetag: 19. 3. 91  
43 Offenlegungstag: 24. 9. 92

DE 41 08 944 A 1

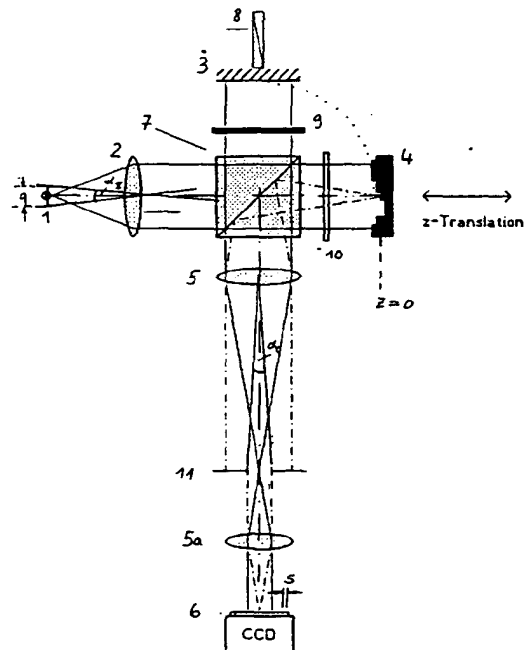
71 Anmelder:  
Häusler, Gerd, Prof. Dr., 8520 Erlangen, DE

72 Erfinder:  
gleich Anmelder

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren und Einrichtung zur berührungslosen Erfassung der Oberflächengestalt von diffus streuenden Objekten

57 Es wird eine Methode beschrieben, mit der man die makroskopische Form von diffus streuenden Oberflächen sehr genau vermessen kann. Die Methode beruht darauf, daß die Interferenzerscheinung zwischen einem Referenzlichtbündel und einem Objektlichtbündel beobachtet wird. Das vom Objekt diffus gestreute Licht hat eine lokal statistisch schwankende Phase. Die Phase gibt keinen Aufschluß über die makroskopische Gestalt der Oberfläche. Die Erfindung gibt an, wie man durch geeignete Beleuchtung des Objektes und Beobachtung der Interferenz die makroskopische Form bestimmen kann. Die Beleuchtung erfolgt räumlich und zeitlich so inkohärent wie möglich. Andererseits ist soviel Kohärenz notwendig, daß "Speckle" beobachtet werden können. Es wird die Interferenzerscheinung in einzelnen Speckles beobachtet. Dort wird nicht die Phase ausgewertet, sondern der Kontrast, während die Objektentfernung oder der Referenzlichtweg variiert werden.



DE 41 08 944 A 1

Es wird ein Verfahren beschrieben, mit dem die Oberflächengestalt von Objekten mit vorzugsweise diffus streuenden Oberflächen mit hoher Genauigkeit gemessen werden kann. Die Oberflächengestalt kann z. B. als der Abstand  $z$  des betrachteten Koordinatenpunktes ( $x, y$ ) zu einer Referenzebene, z. B. bei  $z=0$ , also die Funktion  $z(x, y)$ , gemessen werden, s. Abb. 1. Die meisten industriell hergestellten Werkstücke haben diffus streuende Oberflächen, wie sie durch Drehen, Fräsen, Schleifen, Gießen entstehen. Aber auch nach Lackierung, Galvanisierung, sind viele Oberflächen optisch rau, d. h. auf treffendes Licht wird nicht gerichtet, sondern mehr oder weniger diffus reflektiert.

Es besteht ein großer Bedarf, solche Objekte für die automatisierte Sichtprüfung genau zu vermessen. Es gibt auch bereits etliche 3D-Sensoren, die eine Vermessung von  $z(x, y)$  ermöglichen. Die wichtigsten Verfahren sind Triangulation in vielen Ausprägungen, Fokussuche, Lauf Zeitmessung und Interferometrie.

Bei genauer Untersuchung der Grenzen der verschiedenen Methoden stellt man fest, daß mit den meisten Methoden die Vermessung von rauhen Objekten nur mit begrenzter Genauigkeit möglich ist. Diese fundamentale Beschränkung beruht auf der statistischen Natur des "Speckle" [1], das bei Beleuchtung von rauhen Oberflächen mit hoher zeitlicher und räumlicher Kohärenz auftritt. Dies kann man z. B. bei der Laser-Triangulation, auf dem die meisten kommerziellen 3D-Sensoren beruhen, beobachten [2, 3]. In [4, 5] wurde gezeigt, daß bei verschiedenen kohärenten Verfahren die Meßunsicherheit  $\delta z$  bezüglich der Tiefe die Rayleigh-Grenze  $\delta z_R$  nicht nennenswert unterschreiten kann. Die Rayleigh-Grenze hängt von der Beobachtungsapertur  $\sin u$  und ggf. dem Triangulationswinkel  $\Theta$  zwischen Beleuchtungsrichtung und Beobachtungsrichtung ab.

$$\delta z = \lambda / (\sin u \cdot \sin \Theta).$$

Beispielsweise für praktische Werte  $\sin u = 0.05$ ,  $\Theta = 30^\circ$ , erreicht man nach [5] mit einer Wellenlänge  $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$  nur eine Meßunsicherheit  $\delta z \geq 32 \mu\text{m}$ . Größere Aperturen und Triangulationswinkel sind technisch unpraktisch und führen zu starker Abschattung, so daß man z. B. nicht in Bohrungen hineinsehen kann. Es sind verschiedene versuche bekannt, diesen Effekt zu umgehen [3, 6]. Es läßt sich jedoch feststellen, daß räumlich und zeitlich streng kohärente Beleuchtung bei Triangulation und Fokussuche keine Verringerung der Meßunsicherheit  $\delta z$  erlaubt, wenn man nicht laterale Auflösung  $1/\delta x$  preisgeben will [5].

Eine Alternative ist die Laufzeitmessung, die mit zeitlich modulierter Laserbeleuchtung arbeitet. Wegen der hohen geforderten Zeitauflösung  $1/\delta t$  ( $\delta z = 1 \mu\text{m} \rightarrow \delta t \approx 10^{-14}\text{s}$ ) ist diese Methode aber zur Zeit noch nicht für hochgenaue Messungen geeignet. Es bleibt noch die Interferometrie: Sie ist die klassische Methode zur Vermessung nicht rauher, also gerichtet reflektierender Oberflächen.

Klassische Interferometer arbeiten sowohl mit räumlich und zeitlich kohärenter (Laser-)Beleuchtung, als auch mit räumlich und zeitlich nahezu inkohärenter Beleuchtung, also z. B. mit ausgedehnten, weißen Lichtquellen, wie Glühlampen.

Für rauhe Oberflächen, also z. B. für geschliffenes aber nicht poliertes Glas, ebenso wie z. B. für gedrehte oder gefräste Oberflächen eignet sich die Interferome-

trie nicht zur Vermessung. Der Grund ist wieder das Speckle: Das Bild der kohärent beleuchteten Fläche ist durch Speckle mit dem Kontrast Eins moduliert, während die inkohärent beleuchtete Fläche keinen Interferenzkontrast zeigt.

Die Phase der Lichtwelle im Bild einer rauhen Oberfläche schwankt statistisch von Speckle zu Speckle. Wenn man nun wie bei der Interferometrie üblich, die Objektwelle mit der Referenzwelle überlagert, sieht man (statt regelmäßig geformter makroskopischer Interferenzstreifen beim blanken Objekt) beim rauhen Objekt nur einen von Speckle zu Speckle statistisch variierenden Interferenzkontrast, der mit der makroskopischen Oberflächenform (die man vermessen will), nicht korreliert ist. Damit läßt sich aus dem Interferenzbild keine Information über  $z(x, y)$  gewinnen. Der Kontrast der Interferenzen verschwindet meist ohnehin, weil die Speckle einen sehr kleinen Durchmesser haben können und dann nicht mehr vom Betrachter aufgelöst werden.

Es sind verschiedene Versuche bekannt, diese Schwierigkeiten zu überwinden. Man kann z. B. eine Wellenlänge benutzen, die größer als die Rauhtiefe der Oberfläche ist: z. B. den  $\text{CO}_2$ -Laser mit  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ .

Eine verwandte Möglichkeit ist die 2-Wellenlängen-Interferometrie [7]. Baut man ein Interferometer mit zwei Beleuchtungs-Wellenlängen  $\lambda_1, \lambda_2$ , so ergibt sich eine effektive Wellenlänge  $\Lambda = (\lambda_1 \cdot \lambda_2) / (\lambda_2 - \lambda_1)$ . Wenn  $\lambda_1$  nahe bei  $\lambda_2$  liegt, wird  $\Lambda$  groß gegen die Rauhtiefe und der Speckleeinfluß ist vernachlässigbar. Damit ist auch eine große Meßgenauigkeit möglich, allerdings treten bei diesem Verfahren Eindeutigkeitsprobleme auf, d. h. das Meßergebnis ist nur bis auf ganzzahlige Vielfache von  $\Lambda$  bekannt.

Hier wird ein anderes interferometrisches Verfahren vorgeschlagen, mit dem man die Schwierigkeit umgeht, daß die Interferenzphase im Speckle nichts über die makroskopische Oberflächenform  $z(x, y)$  aussagt. Zur Vorgeschichte: Seit langer Zeit [8] ist bekannt, daß man mit "Weißlicht-Interferenzen" z. B. die Höhe von Stufen in polierten Substraten ohne Eindeutigkeitsprobleme bestimmen kann, weil Weißlicht-Interferenzen nur dort maximalen Kontrast haben, wo die Weglängen im Objektarm und im Referenzarm exakt gleich sind.

Dazu die Abb. 2a: Sie zeigt ein Interferometer mit der weißen Lichtquelle (1), dem Referenz-Spiegel (2), dem Objekt (3). Das Objekt bestehe beispielsweise aus einer Stufe mit einem Höhenversatz  $\Delta z$ . Nach Interferenz der Objektwelle und der Referenzwelle über den Teiler (4) entsteht in der Bildebene (5) (Linsen hier weggelassen) ein Interferenzbild wie in Abb. 2b angedeutet, wenn der Referenzspiegel geringfügig um die Achse (6) gekippt ist. Der Höhenversatz  $\Delta z$  bewirkt nach Abb. 2b einen Versatz der Interferenzerscheinung um  $\Delta y$ . Man kann auch zwei kleine Empfänger an den zu A und B korrespondierenden Positionen A' und B' in der Bildebene anbringen. Wenn nun das Objekt langsam entlang der z-Richtung bewegt wird, messen die beiden Photodetektoren jeweils ein Interferenzsignal  $I(A')$  und  $I(B')$  nach Abb. 2c. Die Maxima von  $I(A')$  und  $I(B')$  sind um  $\Delta z$  gegeneinander versetzt.  $\Delta z$  läßt sich also daraus bestimmen.

Mit diesem Wissen hat bereits Michelson [8] das Urmetervermessen. Auch in der Interferenz-Mikroskopie ist die Methode Standard. Kürzlich wurde von M. Davidson [9] eine automatisierte Version dieser Standardmethode vorgeschlagen, zur Vermessung von Wafer-Oberflächen für die Halbleiter-Photolithographie. Sie

beruht auf dem gleichen bekannten Prinzip.

Die Methode funktioniert aber nicht ohne weiteres für raue Oberflächen. Dort gibt es eben keine Interferenzstreifen. Sie ist von Davidson auch ausdrücklich nur für Wafer (die immer poliert sind) vorgesehen. Bei Davidson wird es als Vorteil angesehen, eine Beleuchtung zu wählen, bei der das Signal-zu-Rausch-Verhältnis "nicht durch Speckle-Effekte verschlechtert ist".

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Methode zur interferometrischen Vermessung auch rauher Oberflächen. Die Methode vermeidet nicht Speckle, im Gegensatz zu der von Davidson beschriebenen Methode, sondern acht ausdrücklich Gebrauch davon und benutzt dazu spezifisch abgestimmte Beleuchtung. Die Anordnung ist eine interferometrische, z. B. wie die in Abb. 2. Dort wird ein Michelson Interferometer benutzt, aber auch die meisten anderen Interferometer sind geeignet. Wesentlich ist, daß die Beleuchtungsapertur, die Beobachtungsapertur, die Kohärenzlänge der Quelle, die Rauhtiefe des Objektes und die Größe des Photoempfängers (Pixels) (oder der Photoempfänger) in der Bildebene so aufeinander abgestimmt sind, daß

- a) bei möglichst geringer Kohärenzlänge möglichst hoher Specklekontrast entsteht,
- b) die Specklegröße größer oder nur unwesentlich kleiner als die Pixelgröße der Photoelemente des Bildaufnahmesystems ist.

Um dies zu gewährleisten, müssen verschiedene Bedingungen erfüllt sein:

Abb. 3 beschreibt beispielhaft die Verhältnisse: Die ausgedehnte Lichtquelle (1) mit dem Durchmesser  $q$  wird von der Beleuchtungslinse (2) vorzugsweise ins Unendliche abgebildet. Vom Objekt (4) erscheint die Quelle unter dem Beleuchtungsaperturwinkel  $\alpha_1$ . Das Objekt (4), ebenso wie der Referenzspiegel (3) werden über den Teiler (7) von den Abbildungslinsen (5, 5a) auf den Photoempfänger (6) abgebildet. Die Eintrittspupille der Abbildungslinse erscheint vom Objekt unter dem Beobachtungsaperturwinkel  $\alpha_0$ . Im Fall von Abb. 3 ist die Beobachtungsapertur durch die Telezentrielle 11, gemeinsam mit der Linse 5 gegeben. Der Referenzspiegel 3 kann vorzugsweise, zur Erzeugung einer Modulation des Interferenzkontrastes, zusätzlich zu einer Grobbewegung, schnell fein verschoben werden, z. B. durch ein Piezo-Stellelement (8). Weiter befinden sich im Strahlengang zur Optimierung des Interferenzkontrastes ein Graufilter (9), sowie zum Ausgleich der Dispersion unterschiedlicher Glaswege, eine Glasplatte (10). Das Objekt, der Referenzspiegel oder der gesamte Sensorkopf können in z-Richtung bewegt werden.

Damit überhaupt Speckle beobachtbar sind, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein: Erstens muß der Beleuchtungsaperturwinkel kleiner, oder zumindest nicht viel größer als der Beobachtungsaperturwinkel sein.

Weiter soll die Kohärenzlänge der Lichtquelle möglichst klein sein, damit die Interferenzen nach Abb. 2c genau lokalisiert werden können. Die Kohärenzlänge darf aber nicht größer oder nicht wesentlich größer als die Rauhtiefe der zu vermessenden Oberfläche sein, da sonst der Specklekontrast verschwindet, und damit die Möglichkeit, eine Interferenzerscheinung nach Abb. 2c zu beobachten.

Der Beobachtungsaperturwinkel nach Abb. 3 bestimmt nicht nur gemeinsam mit der Beleuchtungsapertur den Speckle-Kontrast, er bestimmt auch die Speckle-Größe  $d$ . Die Specklegröße darf nicht wesentlich klei-

ner als die Größe  $s$  eines einzelnen Photoempfängers auf dem Feld der Photoempfänger (6) (z. B. auf einer nachgeschalteten Fernsehkamera) in der Bildebene sein. Es gilt  $d \sim \lambda / \sin \alpha_0$ .

Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, ist der Specklekontrast des Ausgangssignals optimal. Es läßt sich dann auch bei rauhen Objekten in jedem Speckle ein individuelles Signal  $I(z)$  wie in Abb. 2c abnehmen, wenn das Objekt (oder der Referenzspiegel entlang der z-Achse bewegt wird. Dies ist möglich, weil innerhalb eines jeden Speckle die Phase annähernd konstant ist, obwohl sie aber von Speckle zu Speckle statistisch schwankt. Diese Schwankungen der Phase betragen von Speckle zu Speckle oft erhebliche vielfache von  $2\pi$ , was eine effektive Weglängendifferenz der Wellenzüge zwischen benachbarten Speckles zur Folge hat.

Der Ort des maximalen Interferenzkontrastes ist damit wegen des fundamental anderen Mechanismus der Signalentstehung in der Bildebene auch nicht ohne Fehler direkt mit der makroskopischen Form der zu vermessenden Oberfläche verknüpft. (Dies ist anders bei polierten Objekten.) Es gibt bei rauhen Objekten vielmehr statistische Schwankungen des maximalen Kontrastes, wie in Abb. 4 gezeigt. Dort die Interferenzerscheinung als Funktion von  $x$  und  $z$  aufgetragen.

Theoretische Untersuchungen zeigen, daß die daraus resultierenden statistischen Fehler der z-Bestimmung, in der Größenordnung der Rauhtiefe des Objektes liegen. Damit ist die Methode auch geeignet, aus der statistischen Variation des gemessenen z-Wertes die Rauhtiefe zu bestimmen. Daß die Fehler nur von der Rauhgkeit des Objektes, jedoch nicht von der Abbildungsapertur abhängen, ist der wesentliche Fortschritt dieses Verfahrens gegenüber fast allen sonstigen 3D-Verfahren, insbesondere der Lasertriangulation. Man kann also mit sehr geringer Apertur in Bohrungen hineinsehen und trotzdem eine extreme Tiefengenaugkeit erzielen.

Für die parallele Erfassung von  $z(x, y)$  für ein 2-dimensionales Feld von Punkten  $(x, y)$  wird zweckmäßig eine Fernsehkamera gewählt. Der Meßvorgang kann beispielsweise wie folgt verlaufen: Das Objekt wird langsam — z. B. in Schritten — durch die Ebene  $z=0$  (s. Abb. 3) in z-Richtung hindurchgefahren. Bis ein bestimmter Objektpunkt  $(x, y)$  die Ebene  $z=0$  passiert, muß er z. B. um  $z_B$  verschoben werden. Für jeden Tiefenschritt werden z. B. drei Interferenzbilder  $O_{1,2,3}$  gespeichert.

Für jedes Bild wird, z. B. mit Hilfe eines Piezo-Referenzspiegels (8), die Phase um  $120^\circ$  verschoben. Mit der mittleren Intensität  $\langle O_i \rangle$  eines Pixels kann man den Kontrast der Interferenzen ausrechnen aus  $K = \sum_i (O_i - \langle O \rangle)^2$ .  $K$  ist eine Funktion der Objektverschiebung. Wenn der betrachtete Objektpunkt gerade bei  $z=0$  liegt, ist der Kontrast maximal und die Entfernung des betrachteten Objektpunktes von der Referenzebene ist  $z'$ .

Man kann auch zur Tiefenabtastung den Referenzspiegel bewegen, was sinnvoll ist, wenn das Objekt groß ist und die Bewegung schnell erfolgen soll. Die Bewegung des Objektes hat den Vorteil, daß die Kamera immer auf die Ebene  $z=0$  fokussiert ist, es existiert kein Schärfentiefeproblem bei der Abbildung und es gibt vollständige Telezentrie, d. h. der Abbildungsmaßstab ist unabhängig von der Entfernung des Meßpunktes.

Die gewählte Ausprägung läßt sich sinngemäß verändern durch Verwendung anderer Typen von Interferometern, wie sie aus der Literatur bekannt sind.

Eine weitere Ausprägung ist dadurch gekennzeichnet, daß die möglichst punktförmige Lichtquelle auf das Ob-

jekt und gleichzeitig näherungsweise auf den Referenzspiegel abgebildet wird. Die Methode arbeitet als Punktsensor. Um das Objekt flächenhaft oder linienhaft zu vermessen muß der Sensor die Oberfläche zweidimensional oder eindimensional abtasten. Der Referenzspiegel kann entweder ein gewöhnlicher Spiegel sein, oder eine Schraubenfläche bilden, wie sie in Abb. 5 dargestellt ist. Wenn die Spiegelschraube um die Achse 1 rotiert, wird der Referenzlichtweg mit konstanter Geschwindigkeit moduliert.

Die Auswertung ist in Abb. 6 dargestellt: der beleuchtete Objektpunkt wird auf die kleine Blende (1) abgebildet, hinter der der Photoempfänger (2) steht. Wenn die Schnecke um die in Abb. 5 gezeichnete Achse (1) rotiert, wird der Referenz-Lichtweg linear mit der Zeit moduliert. Der Photostrom ist mit einer konstanten Frequenz  $f$  moduliert, die sich aus der Steigung  $m$  der Schnecke, der Umdrehungszahl  $U$  [ $\text{sec}^{-1}$ ] und der Wellenlänge  $\lambda$  ergibt:

$$f = m \cdot U / (\lambda/2).$$

Das Signal  $I(t)$  der Photodiode ist wie in Abb. 2c dargestellt. Nach Verstärkung (3) und Bandpaßfilterung (4) erhält man ein Signal mit wenig Rauschen, das einfach durch Gleichrichtung (5) und Tiefpaßfilterung (6) demoduliert wird. Vom demodulierten Signal, von dem Abb. 6a ein Oszillogramm zeigt, braucht man nur noch das Maximum zu bestimmen, um den Zeitpunkt  $t'$ , der zur Tiefe  $z'$  gehört, zu ermitteln.

Eine weitere Ausprägung dieses Punktsensors ist in Abb. 7 wiedergegeben, die mehrere andere Merkmale enthält, die mit den oben beschriebenen Ausprägungen kombinierbar sind: Zunächst wird die vorzugsweise kleine Lichtquelle (1) über die Linse (2) auf das Objekt (6) abgebildet. Das Referenzsignal wird über den Teiler (3), den Umlenkspiegel (4) und den Referenzspiegel (5) geleitet. Das Interferenzsignal wird in der Pupille ausgewertet, auf die gleiche Weise, wie in Abb. 6 dargestellt. Die Blende 7 und der Photoempfänger 8 befinden sich nun im Fresnel Feld des Objektes, es gibt keine Abbildung des Objektes mehr. Diese Modifikation erspart Linsen und eine genaue Justierung, außerdem sind die Speckle in der Pupille größer und einfacher auszuwerten. Die Anordnung nach Abb. 7 hat zusätzlich einen gefalteten Referenzarm, (3, 4, 5), um den Sensorkopf kompakter zu machen. Eine besonders einfache Modifikation ergibt sich, wenn der Sensorkopf insgesamt, z. B. mit einem Robotarm mit konstanter Geschwindigkeit in  $z$ -Richtung bewegt wird, wobei die Auswertung wie nach Abb. 7 erfolgt.

Eine weitere vorteilhafte Ausprägung des Meßprinzips, mit der man sich die Tiefenabtastung ersparen kann, ergibt sich durch Einführung von Dispersion, s. Abb. 8: Die punkt- oder linienförmige nicht monochromatische Quelle (1) wird mit der Linse (2) zunächst auf einen Spektrometerspalt (3) abgebildet, sodann mit der Linse (4) über den Teiler (5) auf das Objekt (7). Wenn das Objekt gekrümmt ist, wie in Abb. 8 dargestellt, erscheint in der gezeichneten Ansicht ein Lichtprofil (8) auf dem Objekt. Im Referenzstrahlengang wird die Lichtquelle über den Teiler auf den Referenzspiegel 6 abgebildet. In einem Interferometerarm (hier im Referenzarm) wird ein dispersierendes Element, z. B. eine Glasfaser oder Glasplatte (9) eingefügt. Dies bewirkt, daß die verschiedenen Wellenlängen verschiedene Lichtwege zurücklegen.

Auf der Abbildungsseite wird mit der Linse (10) das

Profil (8) und das über den Referenzarm laufende Lichtquellenbild gemeinsam in die Bildebene 12 abgebildet. Durch das Prisma (11) oder ein anderes dispersierendes Element, wie z. B. ein Gitter, braucht werden die verschiedenen Wellenlängen örtlich getrennt. Das Bild wird beispielsweise mit einer Fernsehkamera aufgenommen und den Kontrast der Interferenzerscheinung örtlich ausgewertet. Die Stellen maximalen Kontrastes beschreiben auf dem Fernsehtarget eine i. a. gekrümmte Kurve, die das Profil (8) oder den Schnitt durch die zu vermessende Oberfläche liefert. Diese Ausgestaltung des Sensors fungiert also als Liniensensor. Eine Modifikation als Punktsensor entsteht einfach durch Verwendung einer punktförmigen Quelle.

#### Literatur:

- [1] J. W. Goodman, "Statistical properties of Laser speckle patterns", in "Laser speckle and related phenomena", ed. J. C. Dainty (Springer Verlag, Berlin 1984)
- [2] G. Bickel, G. Häusler, M. Maul, "Triangulation with expanded range of depth", Opt. Eng. 24 6, 975 (1985)
- [3] G. Häusler, J. Hutfless, M. Maul, H. Weißmann, "Range Sensing based on Shearing Interferometry", Appl. Opt. 27 22, 4638 (1988)
- [4] G. Häusler, J. M. Herrmann, "3D-Sensing with a confocal optical 'macroscope'", Proc. of the 15th Congress of the International Commission of Optics, Garmisch-Partenkirchen, SPIE 1319, 359 (August 1990)
- [5] G. Häusler, J. M. Herrmann, "Range Sensing by Shearing Interferometry: Influence of Speckle", Appl. Opt. 27 22, 4631 (1988)
- [6] G. Häusler, "About fundamental limits of three-dimensional sensing or nature makes no presents", Proc. of the 15th Congress of the International Commission of Optics, Garmisch-Partenkirchen, SPIE 1319, 352 (August 1990)
- [7] G. Häusler, Deutsche Patentanmeldung P 36 14 332.4 vom 20. 4. 1986
- [8] A. F. Fercher, H. Z. Hu, U. Vry, "Rough Surface Interferometry with a Two-Wavelength Heterodyne Speckle Interferometer", Appl. Opt. 24, 2181 (1985)
- [9] A. A. Michelson, "Determination experimentale de la valeur du metre en longueurs d'ondes lumineuses", Trav. mem. Bur. Int. Poids Mess. 11, 1 (1985)
- [10] M. Davidson, K. Kaufman, I. Mazor, F. Cohen, "An Application of Interference Microscopy to Integrated Circuit Inspection and Metrology", Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 775, 233 (1987)
- [11] B. S. Lee, T. C. Strand, "Profilometry with a coherence scanning microscope", Appl. Opt. 29, 3784 (1990)

#### Patentansprüche

1. Interferometrische Anordnung zur dreidimensionalen Vermessung von diffus streuenden Objekten, bestehend aus einer Lichtquelle nebst optischen Elementen, die vom Objekt aus unter einem Beleuchtungsaperturwinkel erscheint, sowie aus einem das Objekt im weitesten Sinne, auch unscharf abbildenden Abbildungssystem, das vom Objekt aus unter einem Beobachtungsaperturwinkel erscheint, dadurch gekennzeichnet, daß

- die Kohärenzlänge der Beleuchtung so gering wie möglich, aber nicht geringer als die Rauhtiefe der Oberfläche gewählt wird,
- der Beleuchtungsaperturwinkel kleiner als der Beobachtungsaperturwinkel ist,

- die Photoempfänger eine Größe haben, die vorzugsweise nicht größer ist als die mittlere Specklegröße der entstehenden Specklemuster,
  - der Kontrast der Interferenzerscheinung in jedem Speckle vorzugsweise getrennt ausgewertet wird, während die Lichtwegdifferenz zwischen Objekt und Referenzbündel moduliert wird,
  - und aus dem Kontrast im Speckle als Funktion der Lichtwegdifferenz die Entfernung des betrachteten Objektpunkts oder die Rauhtiefe der betrachteten Oberfläche bestimmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Objekt in eine Bildebene abgebildet wird, in der sich ein Feld von Photoempfängern befindet, deren Signalkontrast einzeln ausgewertet wird, während der Referenzspiegel eine phasenmodulierte Welle erzeugt und das Objekt, der Referenzspiegel oder der gesamte Sensorkopf entlang der optischen Achse bewegt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Objekt punktförmig beleuchtet wird und der beleuchtete Punkt in eine Bildebene abgebildet wird, und dort mit einem Photoempfänger, der vorzugsweise nicht größer als der Speckledurchmesser ist, der Kontrast der Interferenzerscheinung ausgewertet wird, während das Objekt oder der Referenzspiegel oder der gesamte Sensorkopf entlang der z-Achse bewegt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1 und 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Objekt punktförmig beleuchtet wird, und daß im Fresnel-Beugungsfeld mit Hilfe eines kleinen Photoempfängers, vorzugsweise nicht größer als der dort beobachtbare Speckledurchmesser, der Kontrast der Interferenzerscheinung ausgewertet wird, während das Objekt, der Referenzspiegel oder der gesamte Sensorkopf in z-Richtung bewegt werden.
5. Verfahren nach Anspruch 1 – 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtwegmodulation durch Rotation eines schraubenförmig geformten Spiegels mit vorzugsweise konstanter Tiefengeschwindigkeit erfolgt.
6. Verfahren nach Anspruch 1 – 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Auswertung des Interferenzkontrastes durch Bandfilterung, Gleichrichtung und Tiefpaßfilterung des Photoempfängersignals erfolgt, wobei der Schwerpunkt oder das Maximum des verarbeiteten Photoempfängersignals vorzugsweise durch Interpolationsmethoden genau bestimmt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 1 – 5, dadurch gekennzeichnet, daß in einem Interferometerarm ein Material mit Dispersion eingefügt wird und so für verschiedene Wellenlängen verschiedene Lichtwege entstehen, daß am Interferometerausgang die verschiedenen Wellenlängen räumlich getrennt werden und auf einem Feld von Photoempfängern der lokale Kontrast der Interferenzerscheinung bestimmt wird und daraus die Form des Objektes bestimmt wird.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

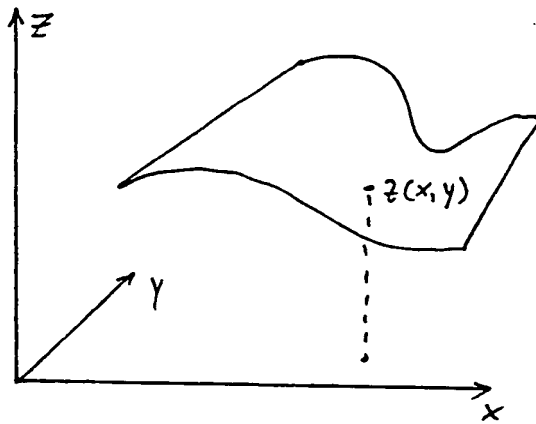


Abb. 1

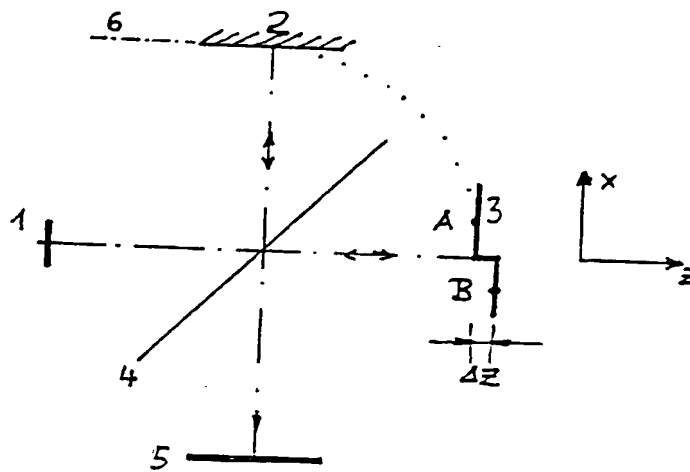


Abb. 2a

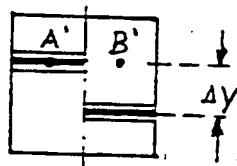


Abb. 2b

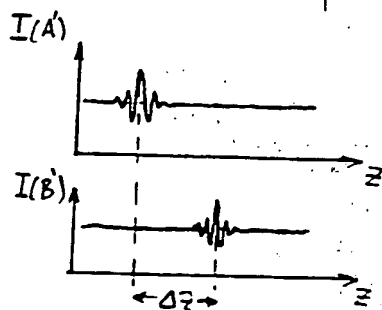


Abb. 2c

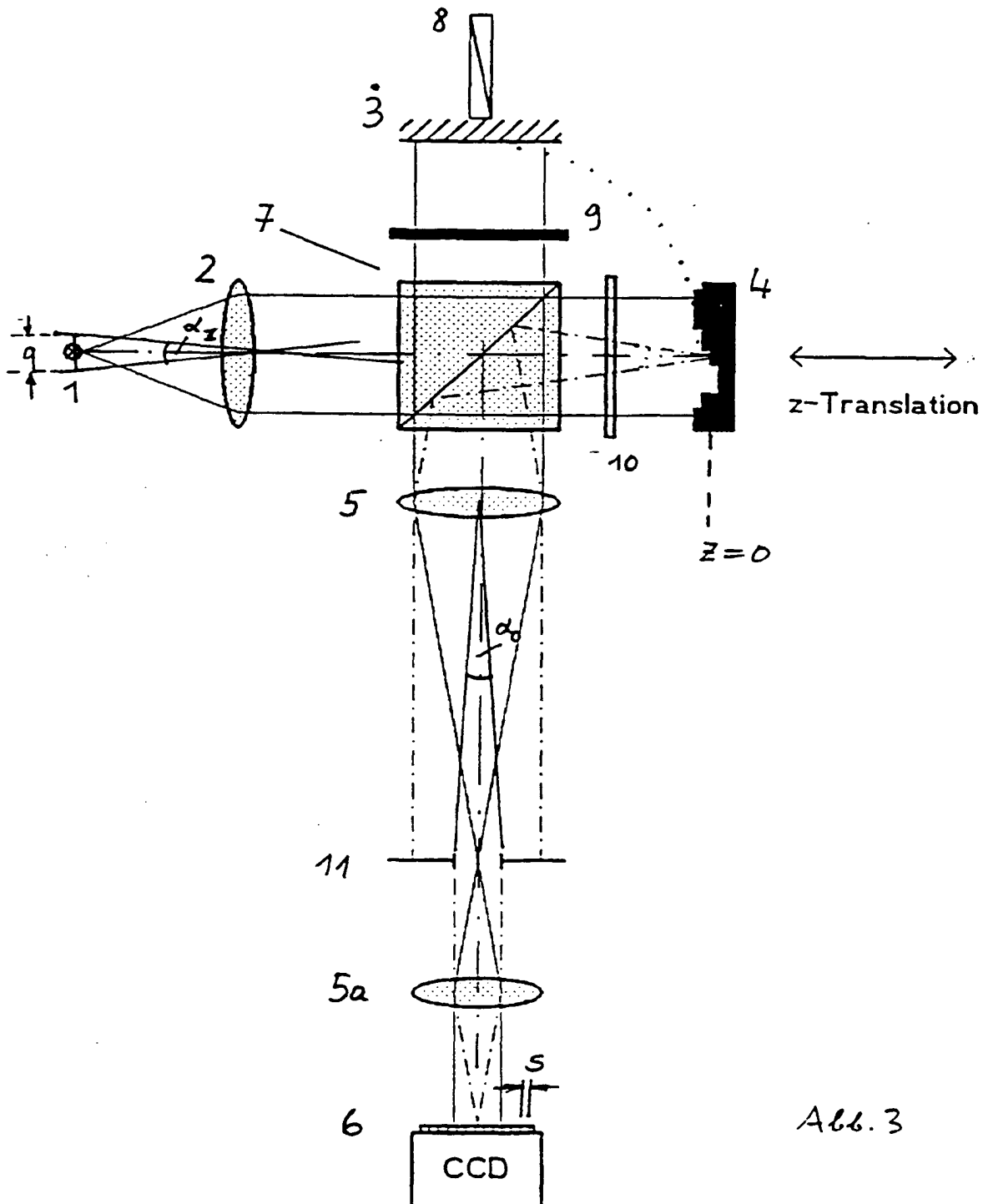


Abb. 3

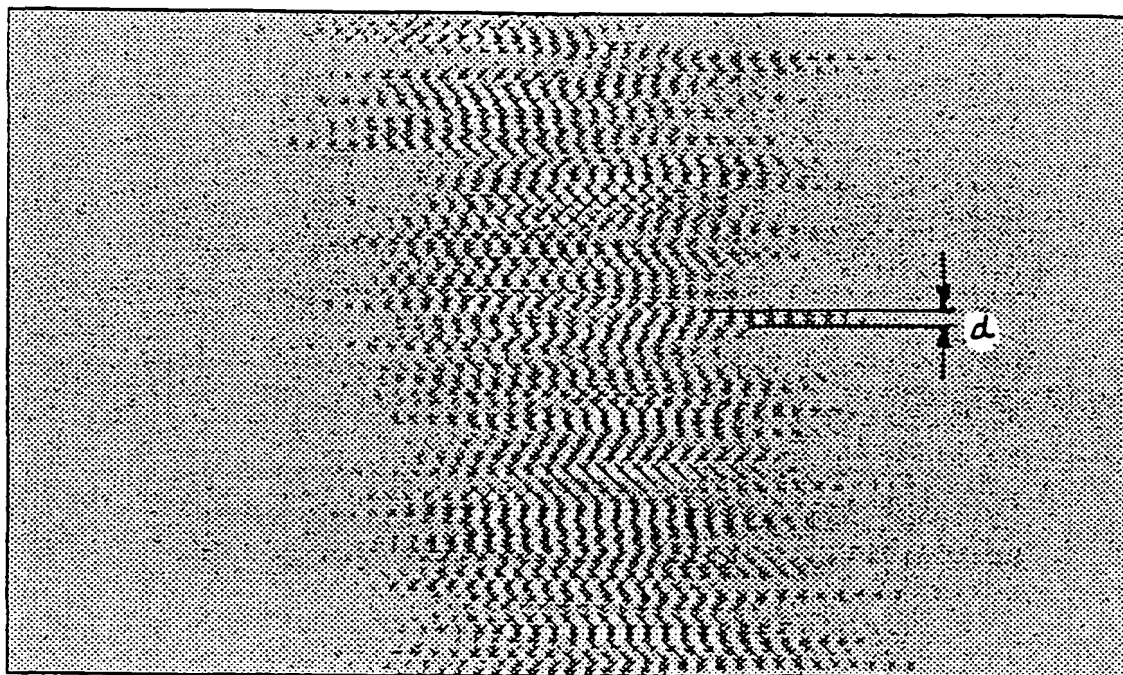


Abb. 4

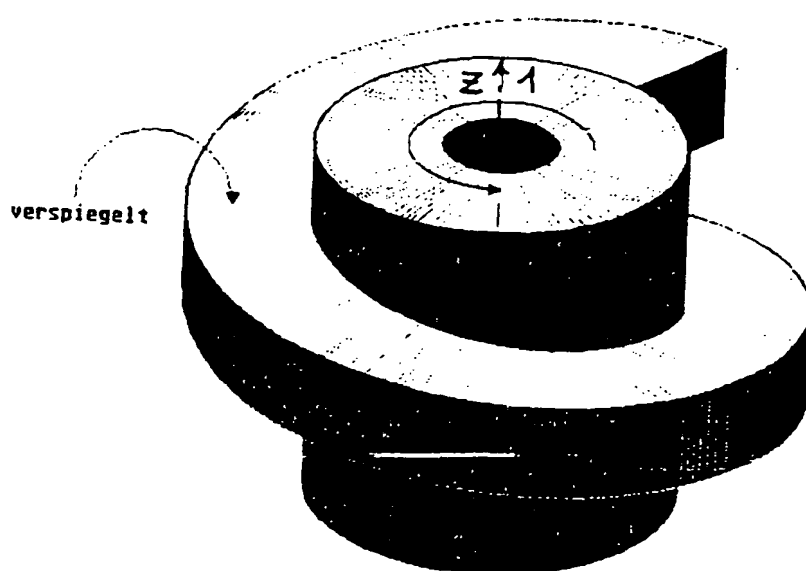
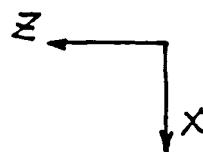


Abb. 5



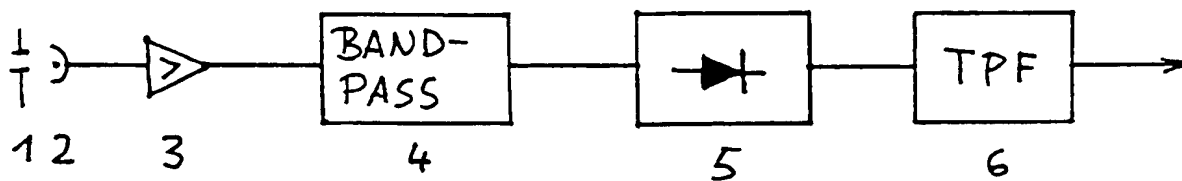


Abb. 6

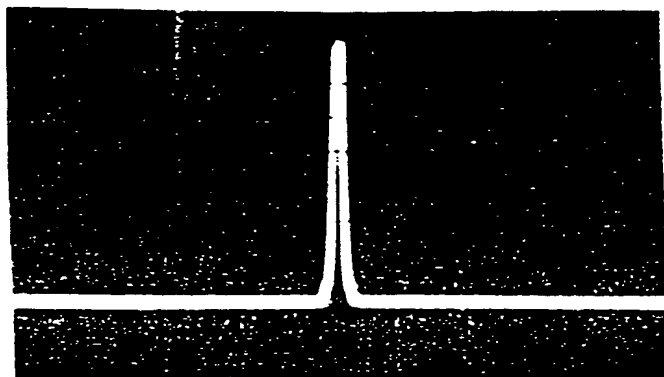


Abb. 6a

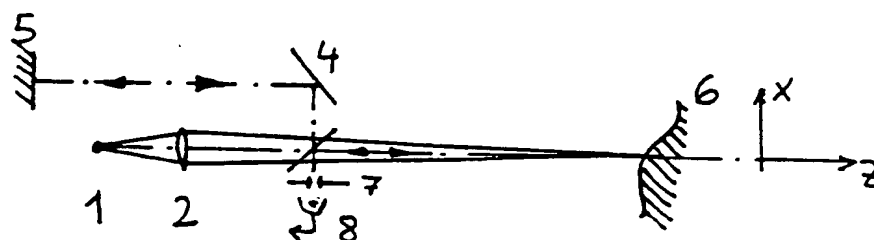


Abb. 7

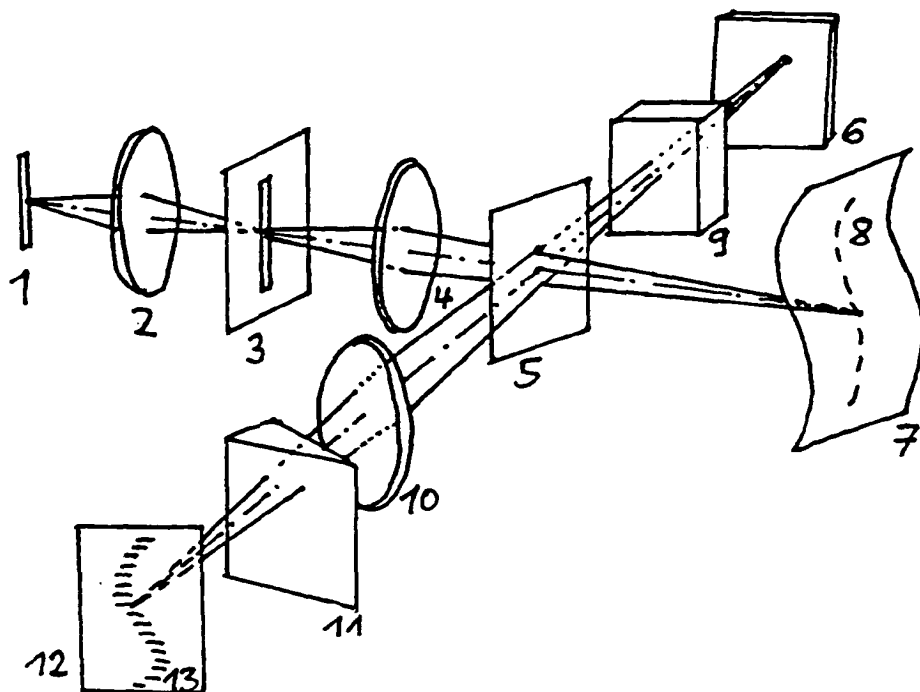


Abb. 8